

На правах рукописи

Васильев Алексей Анатольевич

**ВЕРТИКАЛЬНАЯ СТРУКТУРА ИНДЕКСА РЕФРАКЦИИ  
ДЕЦИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН И ЕЕ ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ**

специальность 01.04.03 - радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Казань – 2011

Работа выполнена в Казанском (Приволжском) федеральном университете

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук  
Хуторова Ольга Германовна

**Официальные оппоненты:**  
доктор физико-математических наук,  
профессор Москаленко Николай Иванович,  
Казанский Государственный Энергетический  
Университет

доктор физико-математических наук  
старший научный сотрудник  
Куликов Юрий Юрьевич  
Институт Прикладной Физики РАН

**Ведущая организация:** Фрязинский филиал Учреждения Российской  
академии наук Институт радиотехники  
и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Защита состоится \_\_\_\_\_ в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного со-  
вета Д 212.081.18 по адресу: 420008, Казань, Кремлевская, 18, Институт фи-  
зики, ауд. \_\_\_\_\_

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Казанского  
федерального университета

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.081.18  
доктор физико-математических наук, профессор

А.В. Карпов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность исследований.*

Исследования прохождения радиоволн в средах начались с появлением радиосвязи. В применении к атмосфере это означало в первую очередь развитие теоретических и экспериментальных исследований закономерностей распространения ультракоротких волн на околоземных трассах в зависимости от метеорологических условий. К числу важных характеристик атмосферы надо отнести коэффициент преломления радиоволн так как, его зависимость от высоты над земной поверхностью вызывает искривление траектории радиоволн и, соответственно, влияет на точность радиотехнических систем. Структуру индекса рефракции как меры изменчивости коэффициента преломления важно исследовать для радиоволн дециметрового диапазона, которые широко используются для целей спутниковой геодезии и радионавигации. Запуски спутников Земли привели к возникновению новых методов исследования атмосферы с помощью радиоволн, приходящих в точку приёма с определённой информацией о состоянии трассы и потребовали изучения влияния атмосферы на характеристики радиоволн.

В России это одна из первых работ, применяющая наземное ГЛОНАСС и GPS оборудование для исследования приземных слоев атмосферы. В России глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) обычно используются для томографии ионосферы или стратосферы [см. работы В.Е. Куницына, О.И. Яковлева, А.Г. Павельева и др.], но мало работ по использованию спутниковых навигационных систем для исследования тропосферы, особенно пограничного слоя. В других странах, таких как Япония, Америка, некоторых странах Европы давно применяются сети GPS для измерения влагосодержания атмосферы.

**Цель работы** – выявление особенностей вертикальной структуры индекса рефракции радиоволн и ее временных вариаций по экспериментальным данным.

Чтобы достичь поставленной цели, необходимо было выполнить следующие **задачи**:

1. Построить эмпирические модели поведения индекса рефракции дециметровых радиоволн в тропосфере и оценить его влияние на спутниковые радиоизмерения.

2. Провести эксперимент радиозондирования атмосферы с помощью сети приемников глобального позиционирования, реализовать методику рефрактометрической оценки вертикальной структуры индекса рефракции радиоволн по измерениям сети приемников ГНСС и провести сравнение результатов с независимыми данными.

3. Выявить и проанализировать полученные закономерности высотно-временных вариаций индекса рефракции дециметровых радиоволн в тропосфере.

### ***Методы исследования***

Решение поставленных задач базируется на комплексном подходе, использующем статистические методы обработки реальных метео и геофизических данных, длинных рядов натурных радиоизмерений, модель коэффициента преломления радиоволн в неоднородной среде. В качестве метода решения обратной задачи применяется метод регуляризации Тихонова.

***Научная новизна*** данной работы заключается в следующем.

1. Впервые получены эмпирические модели сезонных вариаций высотного профиля индекса рефракции дециметровых радиоволн в тропосфере для региона г. Казани.
2. Впервые методом пассивного радиозондирования получены длинные ряды профиля индекса рефракции дециметровых радиоволн сетью приемников ГНСС, проведено сравнение результатов с независимыми данными для региона г. Казани.
3. Впервые по данным пассивного радиозондирования сетью приемников ГНСС получены суточные и межсуточные вариации вертикальной структуры индекса рефракции дециметровых радиоволн, сделаны оценки вклада в его дисперсию атмосферных вариаций различного временного масштаба.

***На защиту выносятся:***

- Экспериментальные результаты пространственных вариаций индекса рефракции дециметровых радиоволн, полученные с помощью сети приемников спутниковых навигационных систем и их сравнение с независимыми данными радиозондирования и реанализа.
- Закономерности пространственно-временной изменчивости неоднородной структуры индекса рефракции дециметровых радиоволн в тропосфере для территории РТ.
- Эмпирические модели сезонных вариаций высотного изменения индекса рефракции дециметровых радиоволн в тропосфере, полученные по радиозондовым данным для окрестности г. Казани.

***Достоверность полученных результатов*** подтверждена базой уникальных данных мониторинга фазовых измерений, выполненных сетью пространственно разнесенных станций в г. Казань ( $55.8^\circ$  с.ш.,  $49.1^\circ$  в.д.) в период с 2007 года по 2010 год включительно, использованием адекватного математического аппарата. Основные результаты подтверждены их сравнением с теоретическими и экспериментальными данными, полученными независимыми исследованиями других авторов.

***Практическая ценность работы.*** Методика, представленная в данной работе, применима для исследований поведения индекса рефракции дециметровых радиоволн в тропосфере над другими территориями. Использо-

ние радиозондирования сигналами систем позиционирования способствует сокращению расходов на получение экспериментальных данных при увеличении временного разрешения, позволяет получить данные мониторинга для расчетов при прогнозе метеопараметров или условий распространения радиоволн в тропосфере.

### ***Личный вклад автора***

Автором выполнены основные работы по решению поставленных задач. Он лично принял участие в работах по созданию сети приемников спутниковых навигационных систем и сбору экспериментальных данных. Реализована методика оценки высотных изменений индекса рефракции дециметровых радиоволн. Проведен эксперимент и получены результаты – вариации пространственной структуры индекса рефракции дециметровых радиоволн в атмосфере и её динамика. Проведен анализ полученных результатов. Сделаны основные выводы по полученным результатам. Автор выражает глубокую благодарность всем своим соавторам за согласие использовать результаты совместно проведенных исследований в диссертации. Вклад соавторов (О.Г. Хуторовой, Г.М. Тептина, А.П. Шлычкова, В.Е. Хуторова) заключался в организации эксперимента и общей постановке задач по направлению исследований, автоматизации обработки некоторых результатов эксперимента, оценке горизонтальной структуры и турбулентных флуктуаций, радиозондовым измерениям метеопараметров.

### ***Апробация результатов***

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Всероссийская научная конференция «Изменяющаяся окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований», Казань, 2009; XVI Рабочая группа «Аэрозоли Сибири», Томск, 2009; Региональная научно-практическая конференция «Геоинформационные системы. Тенденции, проблемы, решения», Казань, 2008; III Межрегиональная конференция «Промышленная экология и безопасность», Казань, 2008; XXII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», Сочи, Сентябрь 2008; II Волжская региональная молодежная научная конференция, Зеленодольск: 2009; международный конгресс «Чистая вода», Казань, 2010; XXI Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, Май 2011; международный симпозиум «Атмосферная Радиация и Динамика», С.-Петербург, 2009 и 2011.

Автор принимал участие в качестве исполнителя в исследованиях, поддержанных грантами: РФФИ 04-05-64194, НИОКР 09-9.5-187, грантом молодых ученых Академии наук РТ 07-2/2008, ГК Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы (№ П162).

***Работа удостоена наград:*** призовое место в секции радиофизика на итоговой студенческой научно-практической конференции КГУ, Казань,

2008; Грамота молодых ученых (1-е место) на II Волжской региональной молодежной научной конференции, Зеленодольск, 2009, диплом конкурса молодых ученых XVI рабочей группе "Аэрозоли Сибири", Томск, Ноябрь 2009.

**Публикации.** Автором опубликовано по теме диссертации 20 работ. Из них 8 статей в научных журналах (из них 3 в журналах, рекомендованных списком ВАК), 7 статей в сборниках трудов научных конференций, 5 опубликованных тезисов докладов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Содержит 103 страницы печатного текста, в том числе 26 рисунков, 3 таблицы. Список литературы содержит 96 источников.

## Основное содержание диссертации

**Во введении** сформулированы актуальность темы, цель и задачи работы, ее научная новизна и практическая значимость.

**Первая глава** содержит анализ современного состояния исследований, имеющих отношение к теме диссертации. Проанализированы факторы, определяющие рефракцию радиоволн дециметрового диапазона в тропосфере.

Обычно используют следующее выражение, связывающее индекс рефракции  $N$  и коэффициент преломления  $n$  параметрами атмосферы:

$$N = (n - 1) \cdot 10^{-6} = 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} + 4.03 \cdot 10^7 \frac{N_e}{f^2},$$

где первое слагаемое определяется влиянием неполярных газов, а второе – водяным паром,  $p$  и  $T$  - давление и температура воздуха в миллибарах и градусах Кельвина соответственно,  $e$  - парциальное давление паров воды (мбар),  $N_e$  - электронная концентрация,  $\text{м}^{-3}$ ,  $f$  - частота радиоволн, Гц.

Ввиду того, что метеопараметры вносят значительный вклад в рефракцию радиоволн дециметрового диапазона, сигналы спутниковых навигационных систем несут в себе информацию, пригодную для исследования тропосферы.

В ходе обзора литературы и исследования настоящей ситуации установлено, что наиболее перспективным способом исследования атмосферы и, в частности, тропосферы является применение спутников глобальных навигационных систем в применении к задачам метеорологии, геодезии, физики атмосферы. На основании проведенного анализа сформулированы основные задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** решается актуальная задача, которая обусловлена необходимостью учета влияния атмосферных процессов на формирование пространственно-временной структуры индекса рефракции радиоволн.

На основе радиозондовых данных изучены зависимости коэффициента преломления от высоты. На основе радиозондовых данных выявлено изменение приземного значения коэффициента преломления в зависимости от вре-

мени. Полученные среднеголетние значения используются далее как эмпирические модели индекса рефракции.

На Рис.1 приведены среднегодовые межуровневые корреляционные коэффициенты сухой и влажной части индекса рефракции дециметровых радиоволн, построенные по периоду радиозондовых наблюдений 1997-2001 гг. Сухая и влажная часть вычислялись из данных метеопараметров по выражению (1) первое и второе слагаемое, соответственно. Значения корреляционных функций – коэффициенты корреляции соответствующего высотного уровня с приземными значениями.

Вертикальные коэффициенты корреляции индекса рефракции положительны, причем наиболее тесная связь ( $r_N > 0,8$ ) отмечается для сухой части в самом нижнем слое атмосферы с высотой до 2500 м. По мере увеличения расстояния между коррелируемыми уровнями коэффициенты корреляции  $r_N$  уменьшаются, однако даже в слоях до 5000 м они оказываются более 0,5.

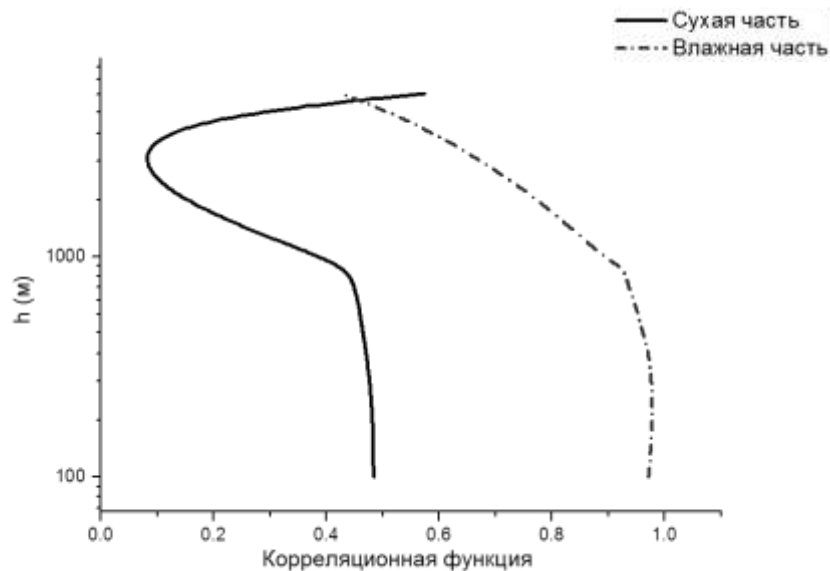


Рис.1 Межуровневые коэффициенты корреляции сухой и влажной части индекса рефракции радиоволн по отношению к приземным рядам сухой и влажной части индекса рефракции.

Как видно из высотной корреляционной функции, влажная часть индекса рефракции в силу своей временной и пространственной изменчивости дает значительно меньшие значения с глубоким минимумом на высотах 2-4 км.

В главе проводится исследование влияния вертикальных неоднородностей основных параметров нижней атмосферы (коэффициента преломления и индекса рефракции), которые определяют рефракцию радиоволн дециметрового диапазона.

В ходе исследования было установлено, что существенный вклад в рефракцию дециметровых радиоволн вносит тропосфера, как слой с максимальным вертикальным градиентом плотности воздуха, кроме того в нём большое содержание водяного пара, который влияет на рефракцию радиоволн деци-

метрового диапазона для систем глобального позиционирования GPS и GLONASS.

Помимо этого исследованы другие слои атмосферы. Так, стратосфера вносит менее значимый вклад в искривление трасс электромагнитных волн дециметрового диапазона. Ионосфера же, ввиду высокой концентрации электронов вносит особый вклад – «отрицательное» искривление. Вклад ионосферы в полную рефракцию можно устранить путем применения многочастотного зондирования.

**В третьей главе** рассмотрена созданная сеть наземных приемников сигналов глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS в г. Казани и эксперимент, который продолжается и в настоящее время.

Дополнительный путь радиоволны от  $i$ -го спутника до  $j$ -й антенны, связанный с рефракцией в атмосфере можно описать как:

$$L_j^i = 10^{-6} \int_s N(s) ds ,$$

Интеграл взят по линии радиотрассы от спутника до антенны. Двухчастотная система приемников позволяет исключить влияние ионосферы в измеренные значения атмосферной задержки радиосигналов. Показано, что радиотрассы, приходящие под разными углами от спутников ГНСС на пространственно разнесенные приемники позволяют решить обратную задачу восстановления высотной зависимости коэффициента преломления радиоволн с достаточно высокой точностью. На основе метода Тихонова был построен алгоритм решения этой задачи.

В качестве начального приближения использовались среднемноголетние высотные зависимости коэффициента преломления для каждого сезона, полученные по радиозондовым данным. Минимизация функционала Тихонова проводилась при граничных условиях, также заданных данными эмпирической модели.

Результаты эксперимента сравнивались с независимыми данными индекса рефракции, полученными по измерениям метеостанции и глобального NCEP/NCAR реанализа. Данные интерполированы для координат, соответствующих центру антенной системы. Полученные таким образом пространственные изменения коэффициента преломления являются в этом исследовании опорными, и в отношении них проводится сравнение оценок соответствующих из спутниковых измерений (Рис.2).



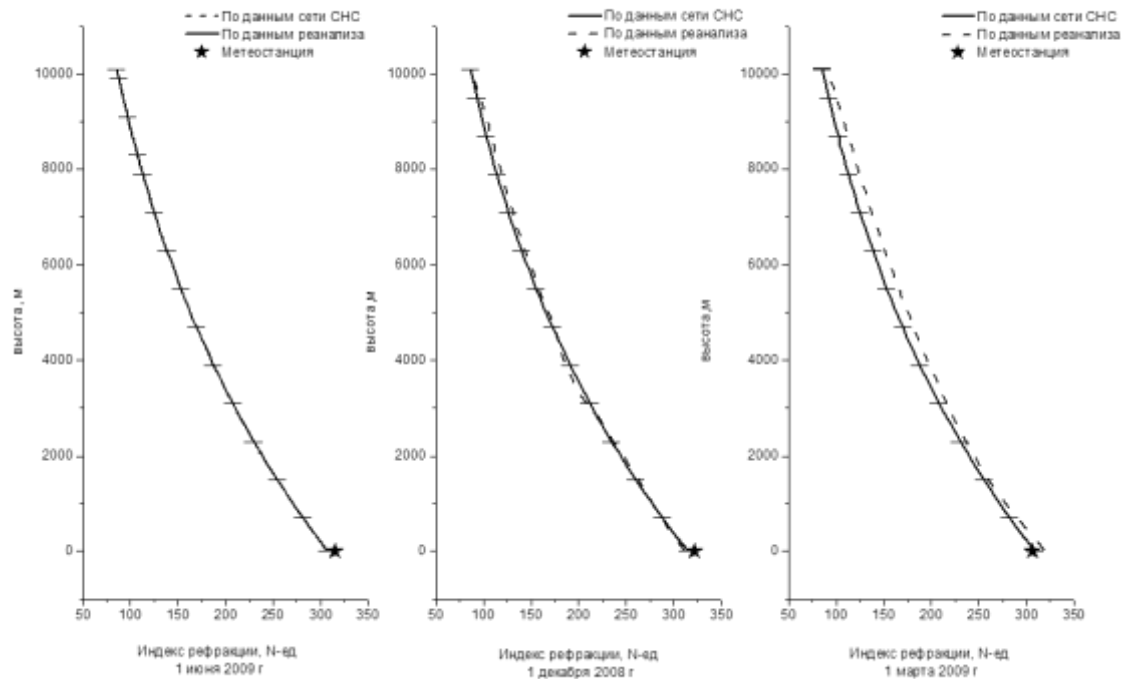


Рис. 2 Высотные профили индекса рефракции для различных сезонов

Сделанные оценки высотной зависимости коэффициента преломления показали, что они хорошо согласуются с данными численного моделирования с использованием погодных полей. Это позволяет заключить, что такие оценки высотной зависимости коэффициента преломления выступают непосредственной характеристикой тропосферы, пригодной для ее мониторинга.

В этой связи, важным преимуществом вычисления высотных зависимостей коэффициента преломления из фазовых сигналов спутниковых навигационных систем, является их оперативность и высокое временное разрешение. В сравнении с данными численных погодных полей NCEP/NCAR, имеющими шестичасовую дискретность и задержку во времени, спутниковые методы позволяют получать интересующий параметр с временным разрешением 30 мин.

Данное исследование позволяет повысить точность и временное разрешение при решении задач исследования тропосферы посредством приемников глобальных систем позиционирования.

**В четвертой главе** обсуждаются экспериментальные результаты исследования высотных зависимостей коэффициента преломления дециметровых радиоволн в тропосфере, полученные по длительному циклу радиозондирования сетью приемников ГНСС в окрестности г. Казани. Установлена их временная изменчивость.

Высокая частота измерений позволяет получить высотные зависимости коэффициента преломления радиоволн, обусловленные суточной динамикой метеопараметров.

Значения, полученные с помощью разработанного метода и рассчитанные по метеопараметрам вблизи поверхности Земли имеют хорошую сходимость, с учетом того, что в измерениях сети приемников СНС кроме суточного хода проявляются вариации внутрисуточные, обусловленные мезомасштабными или макротурбулентными процессами.

Экспериментально, по независимым данным, проверена динамика полученного суточного изменения коэффициента преломления на различных высотных уровнях.

Высокая частота измерений позволяет получить вариации индекса рефракции радиоволн, обусловленные суточной динамикой метеопараметров. Ниже представлены примеры суточного хода индекса рефракции радиоволн на поверхности Земли и на высоте 100 м для 29.09.08 и 01.12.08 соответственно (Рис.3). Для сравнения представлены также суточные хода, рассчитанные по данным метеостанции.

Метеостанция расположена на расстоянии около 10 км от ближайшей антенны. Данные метеостанции представлены с разрешением 3 часа, суточный ход по данным сети приемников дан с временным разрешением 30 мин. На этих рисунках видно хорошее совпадение данных в точках, где присутствуют значения с метеостанции и восстановленных значений. Видно, что относительная ошибка нашего решения относительно экспериментальных данных вблизи поверхности Земли довольно низкая, с учетом того, что в измерениях сети приемников СНС кроме суточного хода проявляются вариации внутрисуточные, обусловленные мезомасштабными или макротурбулентными процессами.

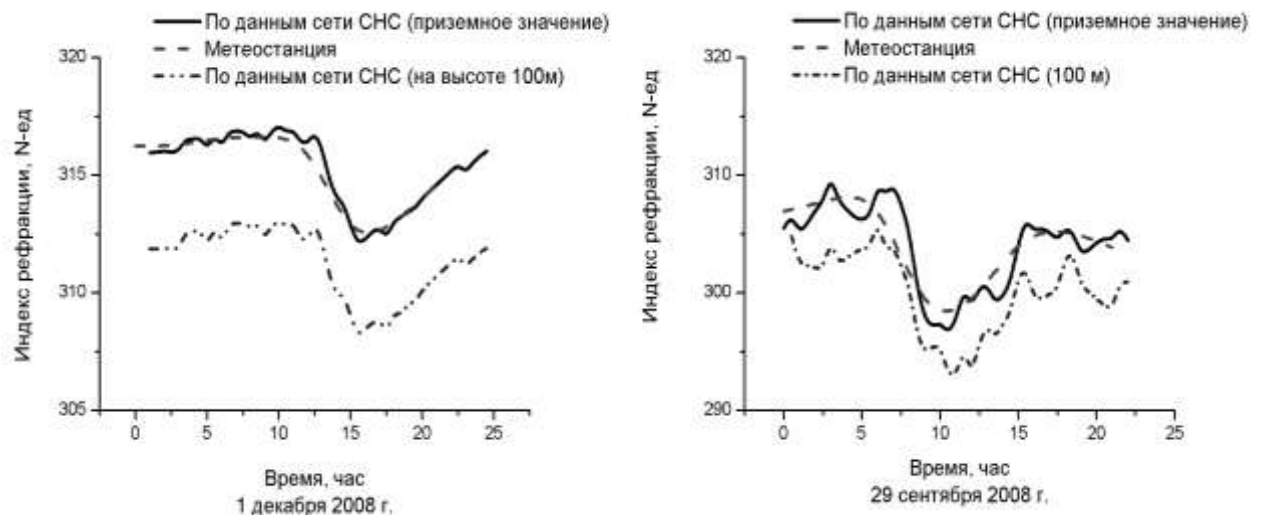


Рис. 3 Примеры суточного хода индекса рефракции

При построении графиков с периодичностью равной периодичности снятия метеопараметров метеостанцией, данные почти полностью совпадают. Подобные вариации были нами исследованы ранее по приземным измерениям сети станций атмосферного мониторинга. Видно, что на высоте 100 м су-

точный ход индекса рефракции в целом почти повторяет приземные вариации, однако расчеты показывают, что высотный градиент в течение суток не постоянен, меняется он и от суток к суткам.

Длинные ряды экспериментальных данных, полученных с помощью сети станций, позволили вычислить суточные вариации коэффициента преломления. При вычислении суточного хода из рядов коэффициента преломления вычитались среднемесячные значения, и полученные ряды усреднялись методом наложения эпох для каждого часа суток. На Рис.4 представлен суточный ход поправки к индексу рефракции, в приземном слое атмосферы.

Суточный ход коэффициента преломления и его внутрисуточные вариации необходимо учитывать при точных расчетах радиотехнических параметров. Например, при расчетах расстояния и угловых размеров объекта в радиолокации и других видах расчетов, где необходима большая точность. Кроме того ход коэффициента преломления может вызывать фазовый шум частотно-модулированного сигнала миллиметрового диапазона.

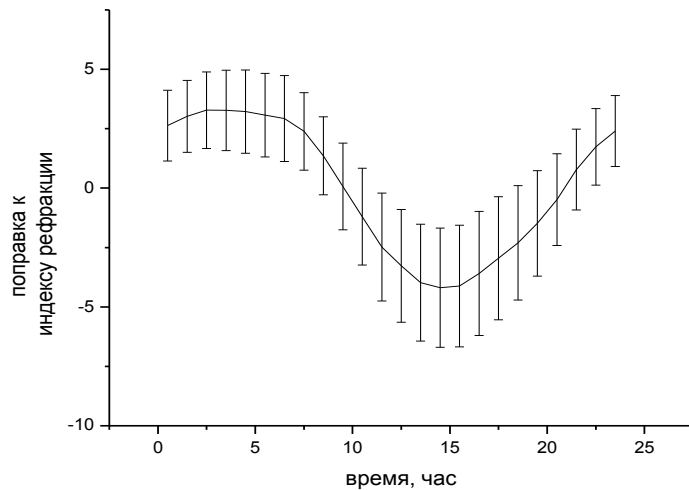


Рис.4 Суточный ход поправки к индексу рефракции в приземном слое атмосферы, отрезки прямых — среднеквадратические отклонения.

Для многих задач спутникового радиозондирования атмосферы и земной поверхности представляет интерес всестороннее исследование возмущения, которое оказывает неоднородная структура реальной атмосферы на распространение радиоволн по различным трассам.

Длинные ряды экспериментальных данных, полученных с помощью сети станций, позволили вычислить сезонные вариации коэффициента преломления. Наиболее значимый сезонный ход отмечен в приземном слое. Минимум значений индекса рефракции в приземном слое достигается в апреле и равен 304 мм/км, а максимум равный 340 мм/км - в августе. Аналогичные результаты сезонных вариаций коэффициента преломления по порядку величин получены в других работах при вычислении коэффициента преломления через метеопараметры из аэрологической базы данных.

Мы провели сравнение решения обратной задачи с профилями индекса рефракции, определенных по радиозондовым данным за период 05.08 - 31.08. 2008 г. Однако, значения радиозондовых данных начинаются с высот в 600 метров, поэтому приземные значения для сравнения взяты из измерений метеостанции.

На Рис.5 показан пример сравнения профилей.

По всему периоду сравнения мы определили средние отклонения результатов пассивного зондирования индекса рефракции от измеренных аэрологическим способом, оно составило 0,2 N-ед в слое до 500 м и -1,4 N-ед на высотах 9500-10000 м, среднеквадратичное отклонение – 6,8 и 3,4 N-ед соответственно

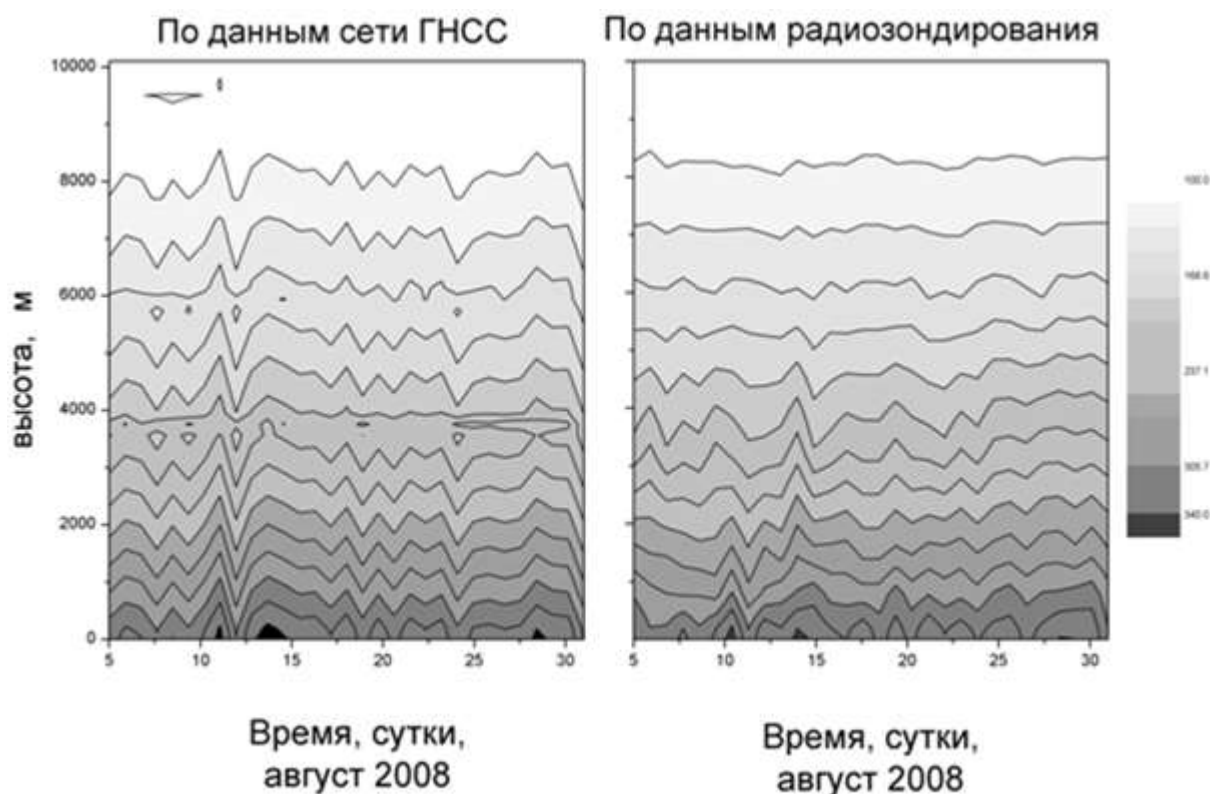


Рис.5 Высотные профили индекса рефракции радиоволн и их сравнение с данными радиозондирования

Это составляет около 2 % от среднего значения для этих высот. Такие величины отклонений показывают хорошее соответствие результатов дистанционного зондирования и независимых радиозондовых измерений. Среднеквадратические отклонения, скорее всего, определяются пространственными мезомасштабными вариациями индекса рефракции, их интенсивность уменьшаются с высотой. Из Рис.5 видно, что структура индекса рефракции обнаруживает существенные межсуточные вариации, связанные с синоптическими атмосферными процессами. Среднеквадратическое отклонение индекса рефракции от среднего составляет 15 и 5 N-ед. на высотах до 500 м и 9500-10000 м соответственно. Как видно, различия данных дистанционного

(ГНСС) и аэрологического зондирования значительно меньше, чем межсуточные вариации индекса рефракции. Они определяют основной вклад в дисперсию на поверхности Земли, в которой по наземным станциям атмосферного мониторинга для региона Республики Татарстан сделаны оценки долей дисперсии индекса рефракции радиоволн за счет атмосферных процессов различного масштаба.

Длинный ряд наблюдений позволил оценить сезонные и синоптические вариации индекса рефракции радиоволн в регионе г. Казани.

В целом межсуточные и сезонные закономерности, выявленные во второй главе, подтверждаются, то есть летом вариации индекса рефракции на всех высотах в тропосфере меньше проявляются, чем осенью и весной, ввиду большей неустойчивости метеоситуации в межсезонье.

По длинным рядам 2007 - 2010 гг. были сделаны оценки интенсивности вариаций индекса рефракции дециметровых радиоволн в приземном слое атмосферы. Результаты приведены в Таблице 1. В Средние значения интенсивности вариаций подразумевают усреднение за весь период времени в данной области временных масштабов вне зависимости от значимости интенсивности вариаций. Для сравнения приведены средние значения исследуемых величин, полученные по длинному ряду.

Последняя строка таблицы дает среднемноголетний вклад вариаций различного масштаба в общую дисперсию индекса рефракции.

Таблица 1

Оценки интенсивности вариаций индекса рефракции дециметровых радиоволн в приземном слое атмосферы для различных временных масштабов

	среднее значе- ние	Сезон- ные	Синоптиче- ские		Суточные		Внутрисуточ- ные	
высо- та, км		макс	макс	Сред	макс	Сред	макс	сред
0-1	325	44	12	2.5	15	4	11,6	2
8-11	92	15	6	1,2	4	1,2	2	1
%		18.3	46.1		17.1		18.5	

Результаты сравнительного анализа амплитуд вариаций индекса рефракции следующие. Амплитуда сезонных вариаций преобладает, хотя средних вклад в дисперсию 18%. Вторыми по интенсивности индекса рефракции, а значит и коэффициента преломления, являются суточные вариации. Интенсивность синоптических вариаций слабо преобладает над мезомасштабными, но именно они дают наибольшую изменчивость индекса рефракции. Как и следовало ожидать, вариации коэффициента преломления радиоволн опреде-

ляются синоптическими, внутрисезонными и мезомасштабными атмосферными процессами. Результаты исследований других авторов свидетельствуют о том, что крупномасштабные неоднородности коэффициента преломления оказывают заметное влияние на радиосигнал при распространении на приземных и космических трассах под малыми углами места. Также, в работах других авторов, показано влияние синоптических процессов на горизонтальную неоднородную структуру коэффициента преломления в приземном слое.

Из данных Таблицы 1 виден заметный вклад мезомасштабных вариаций в дисперсию индекса рефракции радиоволн. Их средний вклад в общую изменчивость индекса рефракции составляет 18,5 %, в основном в слое до 3 км от поверхности Земли.

Отметим, что такой полный анализ временных вариаций индекса рефракции по данным сети станций приемников ГНСС проведен впервые. На статистически надежном материале, он показывает необходимость учета мезомасштабных вариаций, которые до сих пор никем не учитываются при оценке точности радиотехнических систем, использующих тропосферный радиоканал. В задачах спутниковой геодезии и навигации следует учесть запаздывание радиоволн в тропосфере, вызывающее ошибки определения дальности.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Построены эмпирические модели высотных профилей индекса рефракции радиоволн в тропосфере для региона г. Казани. Установлено, что сезоны, имеющие наибольшие вариации, это осень и весна, ввиду нестабильности метеопараметров. Вариации индекса рефракции в приземном слое атмосферы в эти сезоны достигают до 40 N-ед, тогда как зимой не более 25 N-единиц, летом – до 35 единиц. Полученные модели использованы в качестве начальных приближений при решении задач дистанционного радиозондирования.
2. Проведен длительный (с 2007 по 2010 гг.) эксперимент по измерению характеристик радиосигналов спутников ГЛОНАСС и GPS сетью наземных приемников. Реализована методика рефрактометрического определения вертикальной структуры индекса рефракции радиоволн по измерениям сети приемников ГНСС. Путем сравнения с независимыми данными реанализа и радиозондирования показано, что сеть приемников достоверно отражает среднюю вертикальную структуру тропосферы. Относительная ошибка для высот до 2 км составляет менее 2 %.
3. Исследованы сезонные, внутрисуточные, суточные и межсуточные вариации высотных профилей индекса рефракции дециметровых радиоволн на большом массиве радиоизмерений приемниками спутниковых навигационных систем. Сделаны оценки вклада в общую дисперсию индекса рефракции атмосферных процессов различного масштаба. Показано, что амплитуда сезонных вариации преобладает, хотя их вклад в дисперсию составляет 18 %. Вторыми по интенсивности являются суточные вариации. Синоптические ва-

риации слабо преобладает над внутрисуточными, но именно они дают наибольшую изменчивость индекса рефракции, их вклад в дисперсию составляет 46,1 %.

*Основные публикации по теме диссертации:*

1. **Васильев, А.А.** О перспективах исследования неоднородной структуры тропосферы с помощью сети приемников GPS- ГЛОНАСС / О.Г. Хуторова, А.А. Васильев, В.Е. Хуторов // Оптика атмосферы и океана.- 2010.- т.23, № 6.- С. 510-514.
2. **Васильев, А.А.** Исследование влияния макротурбулентности на распространение радиоволн по измерениям сети приемных станций ГЛОНАСС – GPS / Г.М. Тептин, О.Г. Хуторова, А.А. Васильев [и др.] // Ученые записки Казанского университета.-2010.-т.152, Кн.1.- С. 23-32.
3. **Васильев, А.А.** Пассивное зондирование структуры коэффициента преломления радиоволн в тропосфере сетью приемников спутниковых навигационных систем в г. Казани / О.Г. Хуторова, Г.М. Тептин, А.А. Васильев [и др.] // Изв. Вузов. Радиофизика.- 2011.- т.54, №1.- С.1-8.
4. **Vasilyev, A.A.** Passive sounding of the radiowaves refraction index structure in the troposphere by the set of satellite navigation system receivers in Kazan city [Text]/ O.G. Khutorova, G.M. Teptin, A.A.Vasilyev [at al.]/ Radiophysics and Quantum Electronics.-2011.- V. 54, N 1.- P.1-8.
5. **Vasilyev, A.A.** Real-time lower- tropospheric data system based on global position system stations / O.G. Khutorova, A.A. Vasilyev, A.G. Maksimov // Environ. Radioecol. Appl. Ecol.- 2007.- V.13, N1.- P 21-27.
6. **Vasilyev, A.A.** Investigations of space temporal structure for atmospheric inhomogenities over Tatarstan / O.G. Khutorova, G.M.Teptin, A.A.Vasiliyev [at al.] // Environ. Radioecol. Appl. Ecol.- 2007.- V.13, N3.- P 20 -24.
7. **Vasilyev, A.A.** Some result of investigations of local by the net of seven GPS- GLONASS receivers / O.G. Khutorova, G.M. Teptin, A.A.Vasiliyev [at al.] // Environ. Radioecol. Appl. Ecol.- 2008.- V.14, N1.- P 17 -22.
8. **Васильев, А.А.** Трехлетний цикл мониторинга атмосферы над территорией г. Казани программно-аппаратным комплексом сети приемников спутниковых навигационных систем и численной мезомасштабной модели // Журнал экологии и промышленной безопасности / О.Г. Хуторова, Г.М. Тептин, А.А. Васильев [и др.] // Журнал экологии и промышленной безопасности.- 2010.- № 3 (47).- С. 96-97
9. **Васильев, А.А.** Мониторинг вариаций влагосодержания атмосферы по данным системы приемников ГЛОНАСС-GPS в г. Казани /Т.Р. Курбангалиев, А.А. Васильев, О.Г. Хуторова //Сборник материалов конгресса «Чистая вода», Казань.- 2010.- С.319-321.
10. **Васильев, А.А.** Оценка высотной структуры пограничного слоя атмосферы в системе мониторинга окружающей среды / А.А. Васильев, О.Г. Хуторова //Журнал экологии и промышленной безопасности 2009.-№ 5.- С.30-33.
11. **Васильев, А.А.** Решение задачи восстановления вертикальной и горизонтальной структуры метеопараметров по радиосигналам спутниковых навигационных систем / А.А. Васильев, В.Е. Хуторов // Труды Всероссийской научной

- конференции «Изменяющаяся окружающая среда и устойчивое развитие регионов: новые методы и технологии исследований». Казань.- 2009.- т.2.-С.42-45.
12. **Васильев, А.А.** Исследование тропосферных неоднородностей сетью станций приемников спутниковых навигационных систем / О.Г. Хуторова, Г.М. Тептин, А.А. Васильев [и др.] // Тез. международного симпозиума "Атмосферная Радиация и Динамика".- С.Пб.- 2009.-С.53
  13. **Васильев, А.А.** Использование глобальной навигационной системы для исследования вертикальной структуры пограничного слоя атмосферы / А.А. Васильев, О.Г. Хуторова // Тез. XVI Рабочей группы "Аэрозоли Сибири".- Томск.- 2009.- С.30-31.
  14. **Васильев, А.А.** Методика применения сети станций спутникового позиционирования для мониторинга состояния атмосферы рт / Хуторова О.Г., Шлычков А.П., Васильев А.А., В.Е. Хуторов //Журнал экологии и промышленной безопасности 2008.- № 3.- С.26-28.
  15. **Васильев, А.А.** О перспективах исследования неоднородной структуры тропосферы сетью приемников спутниковых навигационных систем / О.Г. Хуторова, Г.М. Тептин, А.А. Васильев [и др.] // Тез. XIV Рабочей группы "Аэрозоли Сибири".- Томск.- 2007.- С.33.
  16. **Васильев, А.А.** Исследование мезомасштабных пространственно-временных вариаций тропосферы с помощью наземных наблюдений сигналов спутниковых навигационных систем / О.Г. Хуторова, А.А. Васильев, А.М. Максимов [и др.] // Труды XXII всероссийской конференции «Распространение радиоволн», Изд-во Северо-Кавказского научного центра высшей школы ФГОУ ВПО «Южный федеральный университет» Ростов.- 2008.- том III.-С.90-93.
  17. **Васильев, А.А.** Методика мониторинга состояния атмосферы РТ сетью станций спутниковых навигационных систем / О.Г. Хуторова, Г.М. Тептин, А.А. Васильев [и др.] // Материалы III научной конференции «Промышленная экология и безопасность», Казань, 2008.- С.154-155
  18. **Васильев, А.А.** Исследования неоднородной структуры примесей в приземном слое на основе данных экологического мониторинга в Республике Татарстан / О.Г. Хуторова, Г.М. Тептин, А.А. Васильев [и др.] // Тез. Всероссийской конференции «Развитие системы мониторинга состава атмосферы (РСМСА)» Москва.- октябрь 2007.- С.20.
  19. **Васильев, А.А.** Рефрактометрический метод исследования профилей индекса рефракции радиоволн по данным сети приемников систем позиционирования / А.А.Васильев [Электронный ресурс] // Труды II Волжской региональной молодежной научной конференции.- Зеленодольск.- 2009.- 1 CD-ROM
  20. **Васильев, А.А.** Исследование вертикальной структуры коэффициента преломления радиоволн в приземном слое с помощью сети приемников спутниковых систем навигации / А.А. Васильев, О.Г. Хуторова // Тез. международного симпозиума "Атмосферная Радиация и Динамика".- С.Пб.- 2011.-С.57
  21. **Васильев, А.А.** Решение обратной задачи восстановления коэффициента преломления в приземном слое с помощью сети приемников спутниковых систем навигации/ А.А. Васильев, О.Г. Хуторова // Сборник докладов XXIII всероссийской конференции «Распространение радиоволн», Изд-во МарГТУ.- Йошкар-Ола.- 2011.- том II.- С.23-25.